

## **SIMULACIÓN ELECTRICA Y TERMICA DE PANELES FOTOVOLTAICOS<sup>#</sup>**

M. Gea, M. T. Montero, C. Cadena

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO - CONICET)

Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta

Tel - Fax 0387-4255489 e-mail: geam@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** Se elaboró un programa de simulación que predice la performance energética de un sistema fotovoltaico para cualquier condición de radiación solar y temperatura ambiente, a partir de las características estándar provistas por el fabricante. La simulación está basada en un modelo formado por un circuito eléctrico y un circuito térmico acoplados. Se compararon los resultados con las curvas I-V de equipos comerciales. Se estudió el comportamiento de un panel fotovoltaico con una carga resistiva a través de una experiencia de campo. Se validó la simulación comparando los resultados teóricos con los experimentales. El programa desarrollado puede ser usado como una herramienta de cálculo y diseño de sistemas fotovoltaicos.

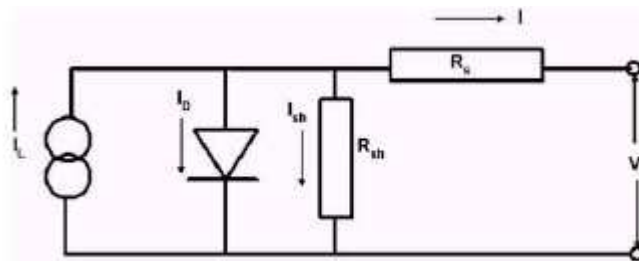
**Palabras clave:** energía solar, paneles fotovoltaicos, simulación.

### **INTRODUCCION**

La potencia entregada por los paneles fotovoltaicos depende de la radiación solar incidente, de la temperatura de la celda y de la resistencia de carga. En general, el fabricante provee datos operacionales limitados del panel, como la tensión en circuito abierto  $V_{oc}$ , la corriente de corto circuito  $I_{sc}$ , los valores de tensión y corriente para máxima potencia  $V_{mp}$  y  $I_{mp}$ , y los coeficientes de temperaturas de tensión a circuito abierto y de corriente de corto circuito. Estos datos están referidos a condiciones estándar de radiación ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) y temperatura de celda ( $25 \text{ C}$ ).

Para predecir la performance de un panel en otras condiciones de operación se elaboraron distintos modelos físicos. Uno de los modelos más estudiados es el desarrollado por el Sandia National Laboratory (Sandia National Laboratories, 2002). Este permite determinar la producción de energía eléctrica para una determinada carga bajo cualquier condición de radiación solar y temperatura de celda, pero requiere como datos de entrada valores del panel que comúnmente el fabricante no provee.

Un modelo más completo y que usa los datos del fabricante está constituido por cinco parámetros: un generador de corriente, un diodo, una resistencia serie, una paralelo y un factor  $a$  de idealidad del diodo modificado para un panel, que depende de la temperatura de celda (Duffie and Beckman, 1991). Su esquema se presenta en la figura 1. Puede ser usado para una celda individual, para el conjunto de celdas que constituyen el panel o para un arreglo de paneles.



*Figura 1: Circuito equivalente del modelo eléctrico de los 5 parámetros para el panel fotovoltaico*

Para simular la producción de un panel para distintas condiciones de radiación y temperatura es necesario acoplar el modelo eléctrico a un modelo térmico. Los modelos acoplados más sencillos suponen estado estacionario, es decir, consideran intervalos de medición de la potencia mucho más grandes que el tiempo de respuesta térmica del modulo. Cuando los valores de radiación fluctúan rápidamente el tiempo de respuesta de la masa térmica del panel es significativa y debe ser considerada en el modelo.

<sup>#</sup> Trabajo parcialmente financiado por el CIUNSa

Para ello la temperatura de la celda debe ser obtenida del balance térmico del panel bajo condiciones no estacionarias, considerando el intercambio de calor convectivo y radiativo de éste con el ambiente.

La reciente utilización de paneles fotovoltaicos integrados a techos y fachadas de edificios ha impulsado el desarrollo de modelos térmicos y eléctricos acoplados los cuales fueron incorporados a programas de simulación de edificios. Uno de estos es el Esp-r (Clarke et al, 1997), el cual predice adecuadamente el impacto del balance térmico del edificio pero puede no ser exacto en la predicción de la energía producida por el panel fotovoltaico (ibpsaNEWS, 2006). Otro programa de simulación de edificios que ha incorporado modelos de paneles fotovoltaicos es el Energy Plus, que utiliza el modelo de predicción de potencia eléctrica desarrollada por el Sandia National Laboratory (Energy Plus Manual, 2006) pero este tiene, como se dijo, la desventaja que requiere datos de entrada que no son incluidos normalmente en la hoja del fabricante.

En este trabajo se presenta la utilización del programa Simusol (Saravia et al, 2000) para realizar una simulación del comportamiento eléctrico y térmico de un panel fotovoltaico. Este programa permite, en una primera etapa, construir de manera gráfica los circuitos equivalentes de los modelos térmico y eléctricos del sistema fotovoltaico. Luego, en una segunda etapa, resuelve las ecuaciones del sistema transitorio generado por los balances energéticos de dichos modelos acoplados. Se utilizó en la simulación el modelo de los cinco parámetros para la producción de energía eléctrica fotovoltaica y un modelo térmico que contempla la inercia térmica del panel y su intercambio de calor con el medioambiente.

## MODELO ELECTRICO

A diferencia de otros, el modelo de los cinco parámetros no precisa experiencias adicionales para determinar sus características y allí radica lo valioso del método. Se vale sólo de datos que brinda el fabricante y utiliza la radiación solar absorbida y la temperatura de celda combinadas en ecuaciones semi empíricas para predecir la curva I-V de la celda (y por lo tanto la potencia) para las distintas condiciones de operación. Fue validado rigurosamente contra datos experimentales y comparado con modelos más complejos (De Soto et al, 2006). Por todo esto es que se elige este modelo para la simulación.

Se comprueba que para una determinada radiación si la temperatura de celda aumenta se produce un decrecimiento en la tensión de circuito abierto y un leve incremento en la corriente de corto circuito. A fin de que el modelo reproduzca estos efectos es necesario conocer como varían los parámetros del circuito con la temperatura. Las siguientes son las ecuaciones que representan con buena aproximación este comportamiento. Fueron encontradas por Townsend y presentadas en Duffie y Beckman, 1991.

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{ref}} \quad (1)$$

$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{V + IR_s}{a}} - 1 \right] \quad (2)$$

$$R_s = \frac{a \ln \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_L} \right) - V_{mp} + V_{oc}}{I_{mp}} \quad (3)$$

$$I_L = \frac{G_T}{G_{Tref}} \left[ I_{Lref} + \mu_{Is} (T_c - T_{cref}) \right] \quad (4)$$

$$\frac{I_0}{I_{0ref}} = \left( \frac{T_c}{T_{cref}} \right)^3 e^{\left[ \frac{eN_s}{a_{ref}} \left( 1 - \frac{T_{cref}}{T_c} \right) \right]} \quad (5)$$

$$\mu_{I_{sc}} = \frac{dI_{sc}}{dT} \cong \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (6)$$

$$\mu_{V_{oc}} = \frac{dV_{oc}}{dT} \cong \frac{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

$I_D$  = corriente de diodo o corriente de oscuridad (A)  
 $I_L$  = corriente fotogenerada (A)  
 $I_0$  = corriente inversa de saturación del diodo (A)  
 $R_s$  = resistencia serie (ohm)  
 $a$  = parámetro de ajuste de la curva  
 $I_{sc}$  = corriente de cortocircuito (A)  
 $V_{oc}$  = tensión de circuito abierto (V)  
 $V_{mp}$  = tensión del punto de máxima potencia (V)  
 $I_{mp}$  = corriente del punto de máxima potencia (A)  
 $\mu_{I_{sc}}$  = coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito (A/K)  
 $\mu_{V_{oc}}$  = coeficiente de temperatura de la tensión de circuito abierto (V/K)  
 $\varepsilon$  = energía de banda prohibida (eV)  
 $T_c$  = temperatura de la celda (K)  
 $T_1, T_2$  = temperaturas cercanas a  $T_c$  (K)  
 $G$  = irradiancia ( $W/m^2$ )  
 $N_s$  = número de celdas en serie  
 Subíndice ref = de referencia

## MODELO TÉRMICO

La temperatura del módulo será calculada con el balance energético a partir de un modelo térmico representado en el circuito de la figura 2, que incluye la radiación solar absorbida, la capacidad calorífica del panel, las pérdidas de calor al medioambiente y la potencia eléctrica producida.

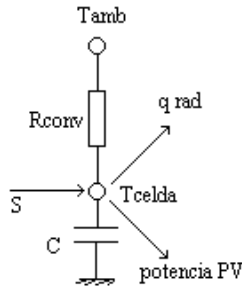


Figura 2: Esquema del circuito térmico para el balance energético del módulo fotovoltaico

### Radiación absorbida por el panel

El factor que más influye en la potencia de salida de un panel fotovoltaico es la radiación solar absorbida por la superficie de la celda. La radiación solar incidente depende del ángulo de ésta respecto a la normal del panel. Además, la fracción transmitida por la cubierta transparente que protege la celda decrece significativamente cuando el ángulo de incidencia es superior a los 65 °. La distribución espectral de la radiación solar está influenciada por la masa de aire, que es la relación entre la masa de aire que atraviesa la radiación en un dado lugar y la que atravesaría si su dirección fuera cenital, debido a la dispersión y a las absorciones selectivas producidas por partículas presentes en la atmósfera. Normalmente no se cuenta con datos medidos de radiación solar sobre el plano del panel, por lo tanto es necesario realizar una estimación usando información de radiación sobre plano horizontal y de ángulo de incidencia. La radiación total absorbida  $S$  se obtiene sumando las componentes directas, difusa y reflejada por el suelo, suponiendo isotrópicas a las dos últimas (Duffie and Beckman, 1991):

$$S = (\tau\alpha) [G_b R_b K_{\tau\alpha b} + G_d K_{\tau\alpha d} (1 + \cos \beta) / 2 + G_p K_{\tau\alpha g} (1 - \cos \beta) / 2] \quad (8)$$

$S$  = Radiación total absorbida por el panel

$(\tau\alpha)$  = Transmitancia-absorbancia del panel para radiación normal al plano

$G_b$  = Componente directa de la radiación total sobre superficie horizontal ( $W / m^2$ )

$R_b$  = Relación entre la radiación sobre plano inclinado y sobre plano horizontal

$K_{\tau\alpha b}$  = Modificador de la radiación directa por efecto de la inclinación respecto a la normal

$G_d$  = Componente difusa de la radiación total sobre superficie horizontal ( $W / m^2$ )

$K_{\tau\alpha d}$  = Modificador de la radiación difusa por efecto de la inclinación respecto a la normal

$\beta$  = Inclinación del panel ( $^\circ$ )

$G$  = Radiación total sobre superficie horizontal ( $W / m^2$ )

$\rho$  = Reflectancia del suelo

$K_{\tau\alpha g}$  = Modificador de la radiación reflejada por el suelo por efecto de la inclinación respecto a la normal

#### Capacidad calorífica del panel

A fin de determinar la efectiva capacidad calorífica del panel para predecir la temperatura de la celda en la evolución transitoria, el módulo es considerado compuesto por tres capas de materiales diferentes: una placa de celdas de silicio monocristalinas, una lámina de Poliéster y Tedlar y una cubierta de vidrio. La temperatura del módulo es supuesta uniforme en toda la superficie y la inercia térmica de los materiales adhesivos y del marco del panel son considerados despreciables. La capacidad calorífica del módulo es la suma de las capacidades caloríficas de sus componentes y se calcula con la ecuación 9 con los valores de la Tabla 1:

$$C = A \sum_i (d_i \rho_i c_i) \quad (9)$$

$C$  = capacidad calorífica del panel ( $J / C$ )

$A$  = área del panel ( $m^2$ )

$d$  = espesor del elemento (m)

$\rho$  = densidad del material ( $kg / m^3$ )

$c$  = calor específico del material ( $J / kg C$ )

Elemento	d (m)	$\rho$ ( $kg / m^3$ )	c ( $J / kg C$ )	C ( $J / C$ )
Celdas de silicio	0,0003	2330	677	211,5
Poliéster/Tedlar	0,0005	1200	1250	335,2
Cubierta vidrio	0,003	3000	500	2011,5
Total				2558,2

Tabla 1: Propiedades de los elementos que componen el panel y cálculo de la capacidad calorífica total

#### Transferencia de calor al ambiente:

Para la determinación del coeficiente de transferencia convectivo se considera predominante la convección forzada ya que el módulo en estudio no esta completamente expuesto a la acción del viento. Se utiliza la expresión dimensional que considera la proporcionalidad con la velocidad del viento (Duffie and Beckman, 1991):

$$h = 2,8 + 3,0 V \quad (10)$$

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2 C$ )

$V$  = velocidad del viento (m/s)

En cuanto a las pérdidas radiativas, estas ocurren hacia las superficies circundantes: el cielo y el suelo. Por lo tanto dependen de la temperatura de éstos, de la emisividad de las superficies y del factor de forma que está relacionado con la inclinación del panel. Para los factores de vista se toman las expresiones de Liu Jordan :  $(1 + \cos \beta) / 2$ , para panel – cielo y  $(1 - \cos \beta) / 2$ , para panel suelo (Duffie and Beckman, 1991). De este intercambio, las pérdidas radiativas resultantes son:

$$q_{rad} = A \sigma (1 + \cos \beta) / 2 \varepsilon_{cielo} T_{cielo}^4 + (1 - \cos \beta) / 2 \varepsilon_{suelo} T_{suelo}^4 - \varepsilon_{panel} T_{panel}^4 \quad (11)$$

$q_{rad}$  = radiación térmica ( $W/m^2$ )

$\sigma$  = constante de Stefan - Boltzmann ( $5,669 \times 10^8 W/m^2 K^4$ )

$\epsilon$  = emisividad de la superficie

$T$  = temperatura (K)

En este trabajo se tomaron  $\epsilon_{\text{cielo}} = 0,95$ ,  $\epsilon_{\text{suelo}} = 0,95$  y  $\epsilon_{\text{panel}} = 0,9$ . Dadas las condiciones de clima seco durante el período de estudio se tomó una temperatura de cielo 20 C menor que la temperatura ambiente. Las pérdidas conductivas a través de soportes y estructura se consideran despreciables.

## SIMULACIÓN DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y TÉRMICOS ACOPLADOS

Para la simulación de los circuitos acoplados se eligió el programa Simusol. Este programa fue inicialmente desarrollado para el estudio de sistemas solares a parámetros concentrados desde el punto de vista térmico. Sin embargo puede ser usado para otros sistemas físicos como eléctricos, hidráulicos, de humedad, etc. También es posible mediante Simusol estudiar sistemas con magnitudes físicas mezcladas. En este trabajo se presenta como se realiza la simulación de los modelos eléctricos y térmicos descritos precedentemente, de manera acoplada, para obtener la performance teórica de la producción de potencia de un sistema fotovoltaico.

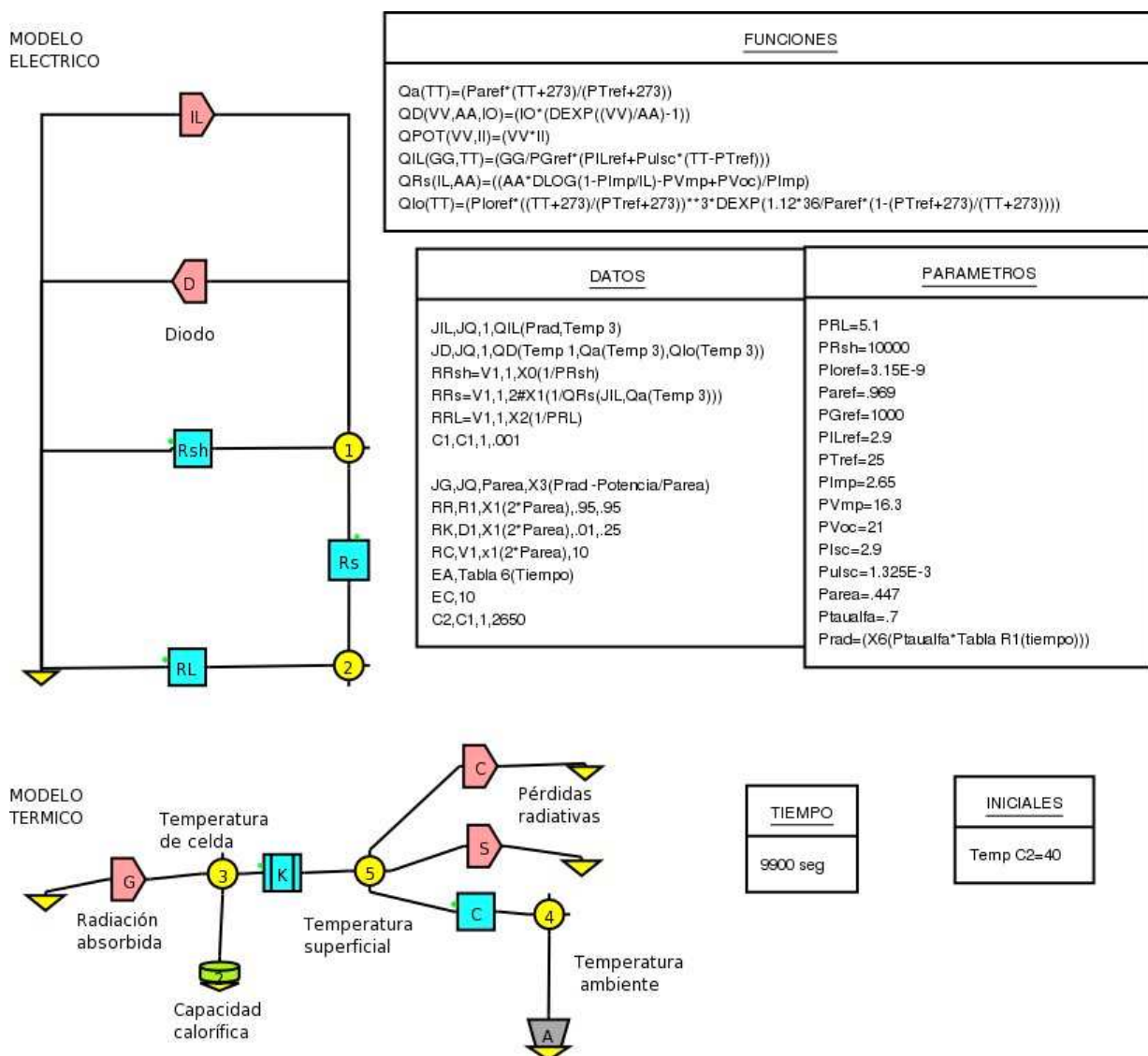


Figura 3: Circuitos y datos de entrada para el programa Simusol

Los circuitos equivalentes que modelizan los procesos eléctricos y térmicos se dibujan en el mismo diagrama (figura 3). En esta hoja se definen los elementos en el cuadro de datos, las condiciones iniciales, las condiciones de borde, la rutina de integración y los parámetros a estudiar. El programa calcula la evolución térmica y eléctrica temporal actualizando en cada paso de cálculo el valor de los parámetros eléctricos en función de la temperatura de la celda con las relaciones definidas en el cuadro de funciones.

Los elementos resistivos y las fuentes de corrientes del modelo eléctrico están predefinidos en Simusol. La característica tensión-corriente del diodo es representada por la función exponencial dada en la ecuación (2). Las características de fábrica del panel fotovoltaico se ingresan como parámetros. El parámetro  $a$  definido en la ecuación (1) y las demás funciones que dependen de la temperatura de la celda están referidas al nodo 3 del circuito térmico. Las ecuaciones (3), (4) y (5) correspondientes a la resistencia en serie, a la corriente fotogenerada y la corriente de saturación inversa respectivamente, se incluyen en el cuadro de funciones. La radiación solar y la temperatura del aire ambiente son ingresadas al programa mediante tablas incluidas en archivos de datos.

## CURVAS I-V

Aunque el programa Simusol toma como variable independiente el tiempo para calcular la evolución transitoria de los circuitos, es posible encontrar la relación I-V de un módulo fotovoltaico variando paramétricamente una carga resistiva desde cero hasta un valor muy grande. A fin de comprobar los resultados obtenidos por la simulación, se estudió un panel fotovoltaico de 36 celdas de Si cristalino en serie que se encuentra en la bibliografía (Duffie y Beckman, 1991). Se utilizaron los datos característicos que allí figuran y que se presentan como Módulo 1 en la Tabla 2. Se generaron las curvas I-V y de potencia para valores fijos de temperatura. Para ello se fijó la temperatura de la celda del modelo (nodo 3) mediante una fuente de temperatura fija para los valores de 25 C y 50 C. Como resultado se obtuvieron las curvas de la figura 4 que son coincidentes con las de la bibliografía.

	A (m <sup>2</sup> )	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	V <sub>MP</sub> (V)	μ <sub>Isc</sub> (A/K)	μ <sub>Voc</sub> (V/K)
Módulo 1	0,427	2,9	20	2,67	16,5	1,325 x 10 <sup>-3</sup>	-0,0775
Módulo 2	0,447	2,85	21	2,65	16,3	1,325 x 10 <sup>-3</sup>	-0,072

Tabla2: Características técnicas de los módulos fotovoltaicos estudiados

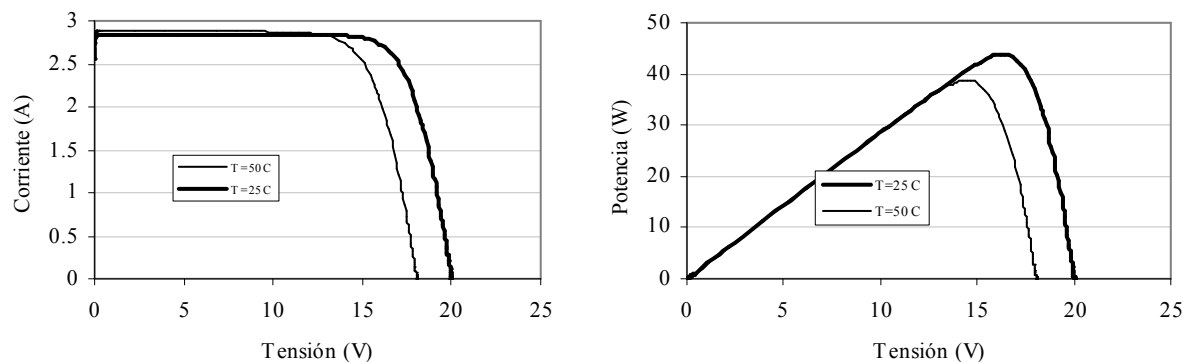


Figura 4: Curvas I-V y P-V del Modulo 1 para condiciones estándar y temperatura de celda de 50 C

La figura 4 muestra el efecto de la temperatura en la curva característica I-V. A una radiación fija, el incremento de temperatura de celda produce un decrecimiento de la tensión de circuito abierto y un leve incremento en la corriente de corto circuito. Estos resultados producidos por la simulación con Simusol reproducen con exactitud las curvas de Duffie and Beckman, 1991, para el modelo de los 5 parámetros.

También se realizó una simulación del comportamiento de un módulo fotovoltaico marca SOLARWATT modelo 12-27 que es estudiado desde hace algunos años en el INENCO. Sus características figuran en la Tabla 2 bajo la identificación de Modulo 2. En la hoja de datos técnicos están las curvas I-V para radiación standart y temperaturas de celda de 25 C y 47 C. En este caso la simulación también reproduce las curvas del fabricante ajustadamente (figura 5).

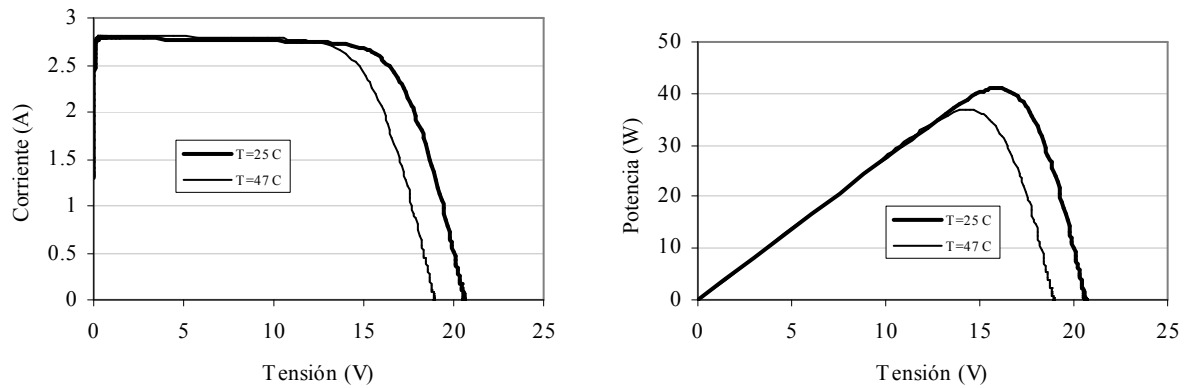


Figura 5: Curvas  $I$ - $V$  y  $P$ - $V$  del Modulo 2 para condiciones estándar y temperatura de celda de 47 C.

## ESTUDIO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de validar los modelos eléctrico y térmico y el programa de simulación, se realizó un estudio experimental consistente en el monitoreo de la producción de potencia de un módulo fotovoltaico conectado a una resistencia de 5,1 ohm mediante la medición de tensión y corriente en la carga. Durante el período de ensayo se midieron además la temperatura ambiente, la temperatura superficial del módulo, velocidad de viento y la radiación solar normal al plano. Las medidas de tensión y corriente se tomaron con voltímetro y amperímetro, las de temperatura con termocuplas, la velocidad de viento con un anemómetro y las de radiación con un solarímetro. Las medidas se tomaron cada hora durante la mañana y mediodía de un día claro. Se cuenta, de ensayos anteriores, con el valor del ( $\tau\alpha$ ) del panel en estudio igual a 0,7.

Los datos experimentales de radiación solar y temperatura ambiente se ingresaron como condiciones de borde del modelo mediante archivos de datos. Como resultados de los balances energéticos de la simulación se obtuvieron la potencia eléctrica, la temperatura de celda y la temperatura de la superficie del panel. Ante lo complicado que resulta medir la temperatura de celda, se tomaron las medidas de la temperatura superficial para contrastar el modelo térmico con los datos experimentales (figura 6). Como parámetro de ajuste se tomó el coeficiente de transferencia de calor por convección que produjo un ajuste adecuado para el valor de 10 W/m<sup>2</sup> C, que se considera adecuado para las condiciones de viento del ensayo.

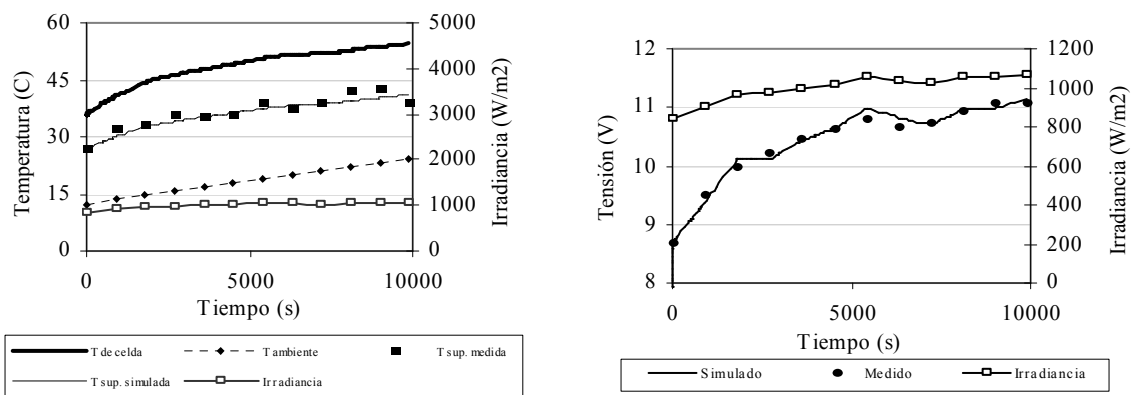


Figura 6: Resultados de la simulación y comparación con datos experimentales para temperaturas y tensión en la carga

También se realizó una comparación entre valores experimentales y teóricos de las variables eléctricas: tensión, corriente y la potencia obtenida como producto de las dos anteriores. Los resultados se muestran en las figuras 6 y 7.

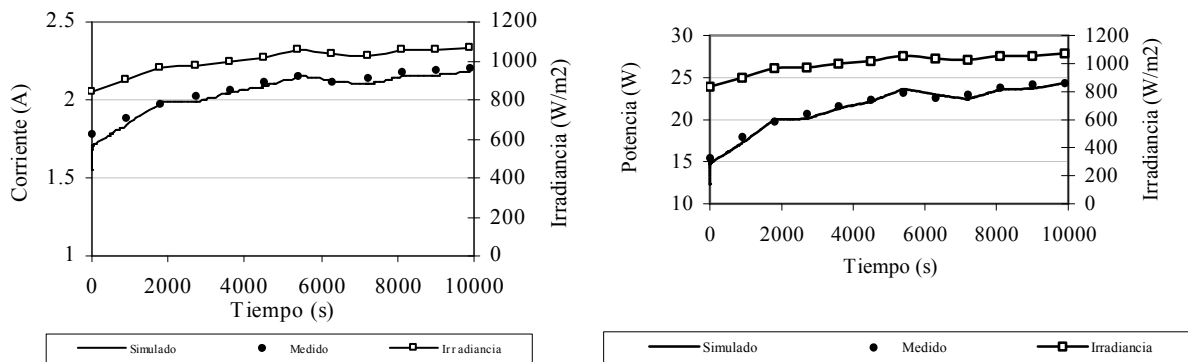


Figura 7: Resultados de la simulación y comparación con datos experimentales de corriente y potencia eléctrica producida

## CONCLUSIONES

La capacidad del programa de simulación de reproducir con buena aproximación la performance de un panel fotovoltaico hace que pueda considerarse a los modelos planteados y al programa de simulación como una buena herramienta de cálculo y diseño de sistemas fotovoltaicos.

Se utilizó el programa Simusol, que además de ser un soft libre, permite construir con simplicidad los circuitos para la simulación en un ambiente gráfico. Esto abre la posibilidad de utilizarlo también como herramienta didáctica en cursos de grado y posgrado.

Los resultados de este trabajo significan una nueva validación del modelo de los cinco parámetros, el cual tiene la ventaja de usar características de los módulos accesibles ya que utiliza sólo los que provee el fabricante. También se concluye que el modelo térmico empleado reproduce bien las condiciones reales.

En este trabajo se utilizó como carga un elemento resistivo. Queda planteado realizar la modelización y simulación de un proceso de carga de batería y de otras aplicaciones comunes de los sistemas fotovoltaicos. También será posible realizar mediante simulación estudios relativos al envejecimiento de los módulos desde el punto de vista óptico (pérdida de las propiedades ópticas de los materiales de la cubierta) como así también desde el punto de vista eléctrico.

## REFERENCIAS

- Clarke J.A Johnstone C.M Kelly N Strachan P.A. (1997). The simulation of photovoltaic-integrated building facades Proceedings of Building Simulation '97 Conference, Prague, Vol 2, pp 189-195.
- De Soto W., Klein S. And Beckman W. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar Energy 80, pp. 78–88.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª edición, pp. 768-780. Wiley Interscience, New York.
- Energy Plus Manual 2006. Documentation Versión 1.3
- ibpsaNEWS, 2006. The Journal of de International Building Performance Simulation Association. Volumen 16. Number 1.
- Sandia National Laboratories, 2002. Database of Photovoltaic Module Performance Parameters. Disponible en: <<http://www.sandia.gov/pv/docs/Database.htm>>.
- Saravia L. y Saravia D. (2000) "Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad". Avances en Energías Renovables, Vol. 4, pp. 8.17 – 8.23.

**ABSTRACT:** A program of simulation that predicts the energetic performance of a photovoltaic system for any condition of solar radiation and environmental temperature, based on the standard characteristics provided by the manufacturer was elaborated. The simulation is based on a model formed by an electrical circuit and a thermal circuit which are coupled. The results with curves I-V of commercial equipments were compared. The behavior of a photovoltaic panel with a resistive load was studied through a field experience. The simulation was validated comparing the theoretical results with the experimental ones. The program developed can be used as a calculating and designing tool of photovoltaic systems.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic panels, simulation.